

6 MeV 전자선의 차폐물질 원자번호와 조사야 크기에 따른 선량변화 연구

전북대학교병원 방사선종양학과

이승훈 · 곽근탁 · 박주경 · 김양수 · 차석용

목적: 본 연구에서 우리는 6 MeV 전자선의 조사야 확대에 따른 선량변화가 차폐물질 원자번호와 관계가 있음을 알아보고 그 영향인자를 분석 하고자 한다.

대상 및 방법: 먼저 평행평판형 전리함(Exradin P11)을 25×25 cm² 폴리스티렌 팬텀표면에 평탄하게 끼운다. 허용투과율 5% 두께의 알루미늄, 구리, 납 물질들을 팬텀 상단에 차폐시킨 후 조사야 6×6, 10×10 그리고 20×20 cm²별로 측정하였다. 조사조건은 선원-표면간거리 100 cm에서 기준조사야인 10×10 cm²에 6 MeV 전자선을 이용하여 100 cGy 조사하였다. 다음으로 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)를 이용하여 각 물질 통과 후 발생하는 광자수, 전자수, 그리고 축적에너지를 계산하였다.

결과: 허용투과율 5% 두께에 대한 차폐물 종류에 따른 측정결과 조사야 10×10 cm²을 기준으로 한 6×6 cm²과 20×20 cm²의 두께변화율은 알루미늄에서 각각 +0.06%와 -0.06%, 구리에서 각각 +0.13%와 -0.1%, 납에서 각각 -1.53%와 +1.92%였다. 계산결과 조사야 10×10 cm² 대비 6×6 cm², 20×20 cm²의 축적에너지는 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -4.3%와 +4.85%, 알루미늄 사용 시 각각 -0.87%와 +6.93%, 구리 사용 시 각각 -2.46%와 +4.48%, 납 사용 시 각각 -4.16%와 +5.57%였다. 광자수의 경우 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -8.95%와 +15.92%, 알루미늄 사용 시 각각 -15.56%와 +16.06%, 구리 사용 시 각각 -12.27%와 +15.53%, 납 사용 시 각각 -12.36%와 +19.81%였다. 전자수의 경우 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -3.92%와 +4.55%, 알루미늄 사용 시 각각 +0.59%와 +6.87%, 구리 사용 시 각각 -1.59%와 +3.86%, 납 사용 시 각각 -5.15%와 +4.00%였다.

결론: 본 연구로 조사야 증가함에 따른 차폐물 두께가 저 원자번호에서 감소하며, 고 원자번호에서는 증가함을 볼 수 있었으며, 계산을 통해 저 원자번호물질에서는 저지방사선, 고 원자번호물질에서는 산란전자가 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

핵심용어: 차폐물질, 원자번호, 조사야크기, 전리함, MCNPX

서 론

전자선 치료는 일반적으로 표재성 종양을 치료하는데 주로 사용되며, 정상조직 및 주요 장기를 보호하기 위해 다양한 형태의 조사야와 차폐물이 사용된다. 전자선 조사야의 경우 6×6, 10×10 그리고 20×20 cm²의 일정한 형태만을 이루고 있는 반면 차폐물은 불규칙한 형태를 만들 수 있어 정밀한 치료시 이용된다. 이런 이유로 차폐물은 많은 연구자들¹⁻⁴⁾의 연구 대상이 되었다. 그 중 Prasad 등²⁾의 연구에 의하면 납 차폐물에 대한 동일 에너지에서 조사야 크기가 증가함에 따라 차폐물 최소두께가 증가하는 것을 알 수 있으며, 차폐물 최소 두께 증가는 측방산란영향에 의한 것이라 설명하였다. 이런 산란전자에 대한 연구는 오래전부터 여러 연구자들

에 의해 발표되었다. Everhart⁵⁾는 리더퍼드의 산란전자 평향 각 공식을 이용하여 산란계수와 원자번호의 비례성을 설명하였으며, Klevenhagen 등⁶⁾은 후방산란이 산란되는 물질의 원자번호와 비례적으로 발생됨을 입증하였다. 즉 모든 산란 전자선은 원자번호가 크게 기여하고 있음을 알 수 있으며, 이는 조사야 변화에도 영향을 미칠 것이라 생각된다. 그러나 Prasad 등¹⁾이 발표한 연구에 따르면 보면 동일에너지에서 조사야 변화에 따른 선량감약율이 물질별 차이에서는 거의 일어나지 않는 것으로 나타난다. 이에 본 연구는 전자선 차폐물질로 이용 가능한 알루미늄, 구리, 그리고 납 등의 다양한 원자번호 물질을 이용하여 원자번호와 조사야 크기에 따른 선량변화와 그 영향인자를 비교 분석하고자 한다.

이 논문은 2013년 5월 30일 접수하여 2013년 9월 1일 채택되었음.

책임저자 : 차석용, 전북대학교병원 방사선종양학과

Tel: 063)250-2017, Fax: 063)250-1192

E-mail: chasy@cuh.co.kr

대상 및 방법

1. 측정

전리함은 창 두께 1 mm, 직경 20 mm인 평행평판형 전리함(Exradin P11)을 사용하였으며, 25×25 cm²의 폴리스티렌(Polystyrene) 팬텀 표면에 고르게 하여 끼워 넣은 후 중심선속에 위치시켰다. 먼저 선형가속기(Clinac IX, Varian, USA)에서 발생된 6 MeV 에너지 전자선을 이용하여 선원-전리함 표면 간격 100 cm, 조사야 6×6, 10×10 그리고 20×20 cm²의 깊이선량률(Percentage depth dose; PDD)을 측정하였다. 다음으로 선원-전리함 표면 간격 100 cm에서 두께 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm이며 직경 25×25 cm²인 차폐물질을 6×6, 10×10 그리고 20×20 cm²의 조사야별로 팬텀표면위에 올려 측정 후 허용투과율 5% 되는 지점의 두께를 기록하였다(Table 1). 측정은 Prasad 등²⁾의 연구를 참고하여 조사야 변화에 따른 선량차이가 크게 나타나는 표면에서 하였으며, 100 cGy를 조사하였다. 차폐물질은 13.2°C 이상에서만 사용해야하는 주석^{1,7)}을 제외한 알루미늄, 구리,

Table 1. The shielding thickness (in mm) of three materials and treatment cone sizes for 5% allowable transmission at SSD 100 cm, 6 MeV

Field size (cm ²)	Attenuation 95%		
	Aluminum (Z=13) (mm)	Copper (Z=29) (mm)	Lead (Z=82) (mm)
6×6	12.379	3.84	2.56
10×10	12.371	3.835	2.6
20×20	12.364	3.831	2.65

그리고 납판을 사용하였다.

2. 계산

광자, 중성자, 양자, 알파입자 그리고 전자가 혼합된 방사선장에서 어느 하나만을 측정한다는 것은 매우 복잡하며 다소 어려움을 가지고 있다. 이에 몬테칼로 계산을 이용한 연구는 입자들의 형태를 분리 계산함으로써 측정의 복잡성을 다소 해결해 줄 수 있다.⁸⁾ 본 계산에 사용된 코드는 광자-중성자-전자를 연계하여 수송할 수 있는 MCNPX (Ver.2.5.0)⁹⁾ 이용하였다. LANL (Los Alamos National Laboratory)에서 개발한 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code)는 방사선 수송해석의 표준코드로 알려져 왔다. 선형가속기 헤드 구성은 Zanini 등¹⁰⁾의 기록을 참조하고 전자선 모드에 맞

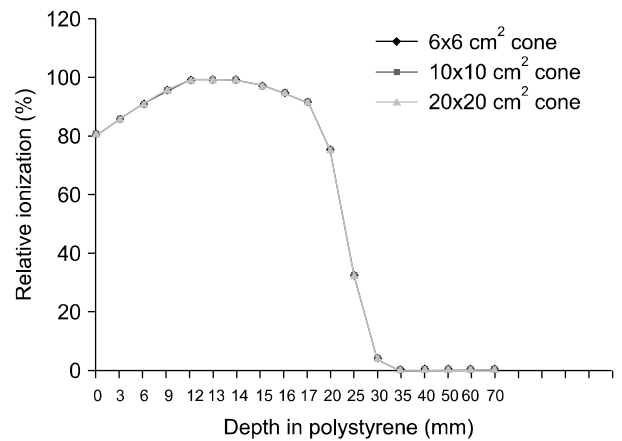


Fig. 2. Relative ionization curves measured using ion chamber in polystyrene for 6×6, 10×10, and 20×20 cm² field sizes at 6 MeV electron beam.

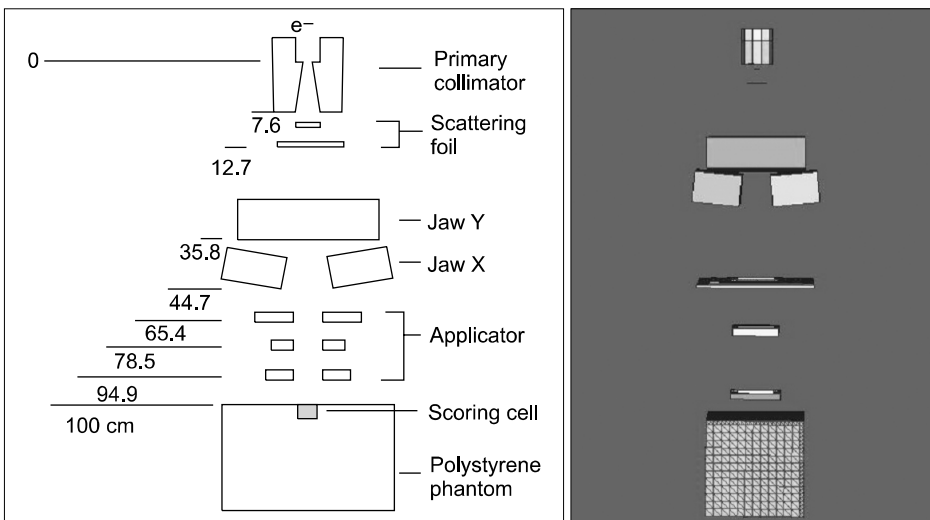


Fig. 1. Schematic diagram of the Varian Clinac IX treatment head.

게 고려하여 표적 위치를 기준($Z=0.0$ cm)으로 일차제한기 (Low surface: $Z=7.6$ cm), 산란박(Low surface: $Z=12.7$ cm), 이차제한기(Y jaw Low surface: $Z=35.8$ cm, X jaw Low surface: $Z=44.7$ cm), 그리고 치료용 콘(Low surface: $Z=94.9$ cm)을 모델화 하였다(Fig. 1).

또한 측정에 사용된 평행평판형 전리함(Exradin P11)의 구성에서 표면창-수집기 간격이 2.0 mm인 점을 고려하여 계산하였다. 먼저 차폐물 없이 기준 깊이 에 따른 선량값을 *F6 tally를 사용하여 계산하고 측정치와 비교하였다. 다음으로 물질별로 조사야 10×10 cm²에서 허용투과율 5% 두께의 차폐물 기준으로 조사야 6×6 과 20×20 cm²에 적용하여 F4 tally로 광자와 전자의 수를 계산하여 비교하였다. 계산에 사용된 히스토리는 조사야별 깊이선량률(PDD)에서 3×10^6 개, 허용투과율 5% 두께의 차폐물 사용 계산에는 5×10^6 개를 사용하였다.

결 과

Fig. 2와 Fig. 3은 측정과 시뮬레이션 값의 일치성을 비교한 것으로 깊이 6 mm 구간의 4.2%를 제외한 대부분의 깊이 선량률(Percent depth dose)은 $\pm 2\%$ 이내를 보여주고 있어 비교적 정확하였다. Fig. 4는 팬텀표면에서의 각 차폐물질 두께에 따른 조사야별 이온값을 나타낸 것으로 방사선 차폐의 기준이 되며 산란전자의 영향을 연구 할 수 있는 허용투과율 5% 지점의 두께를 찾아 Table 1에 제시하였다. 차폐물의 두께에 따른 조사야 10×10 cm² 기준으로 6×6 cm²과 20×20 cm²의 두께변화율은 알루미늄에서 각각 +0.06%와 -0.06%, 구리에서 각각 +0.13%와 -0.1%, 납에서 각각 -1.53%와 +1.92%였다. Table 2는 몬테칼로 시뮬레이션을 이용하여 물질별 조사야 10×10 cm²에서의 허용투과율 5% 두께를 기준으로 조사야 변화에 따른 광자수(photon flux), 전자수(electron flux) 그리고 축적에너지(energy deposition)를 계산

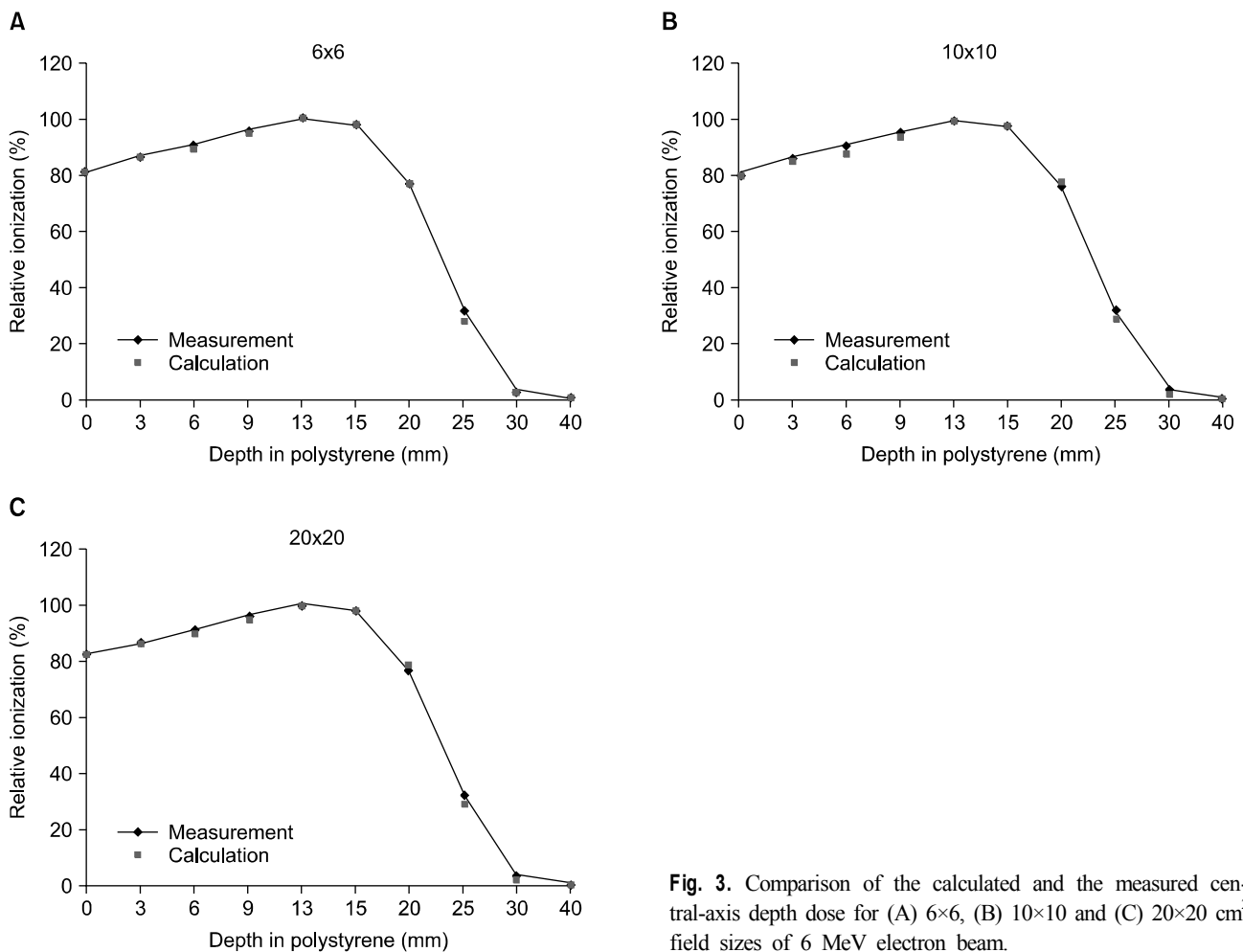


Fig. 3. Comparison of the calculated and the measured central-axis depth dose for (A) 6×6 , (B) 10×10 and (C) 20×20 cm² field sizes of 6 MeV electron beam.

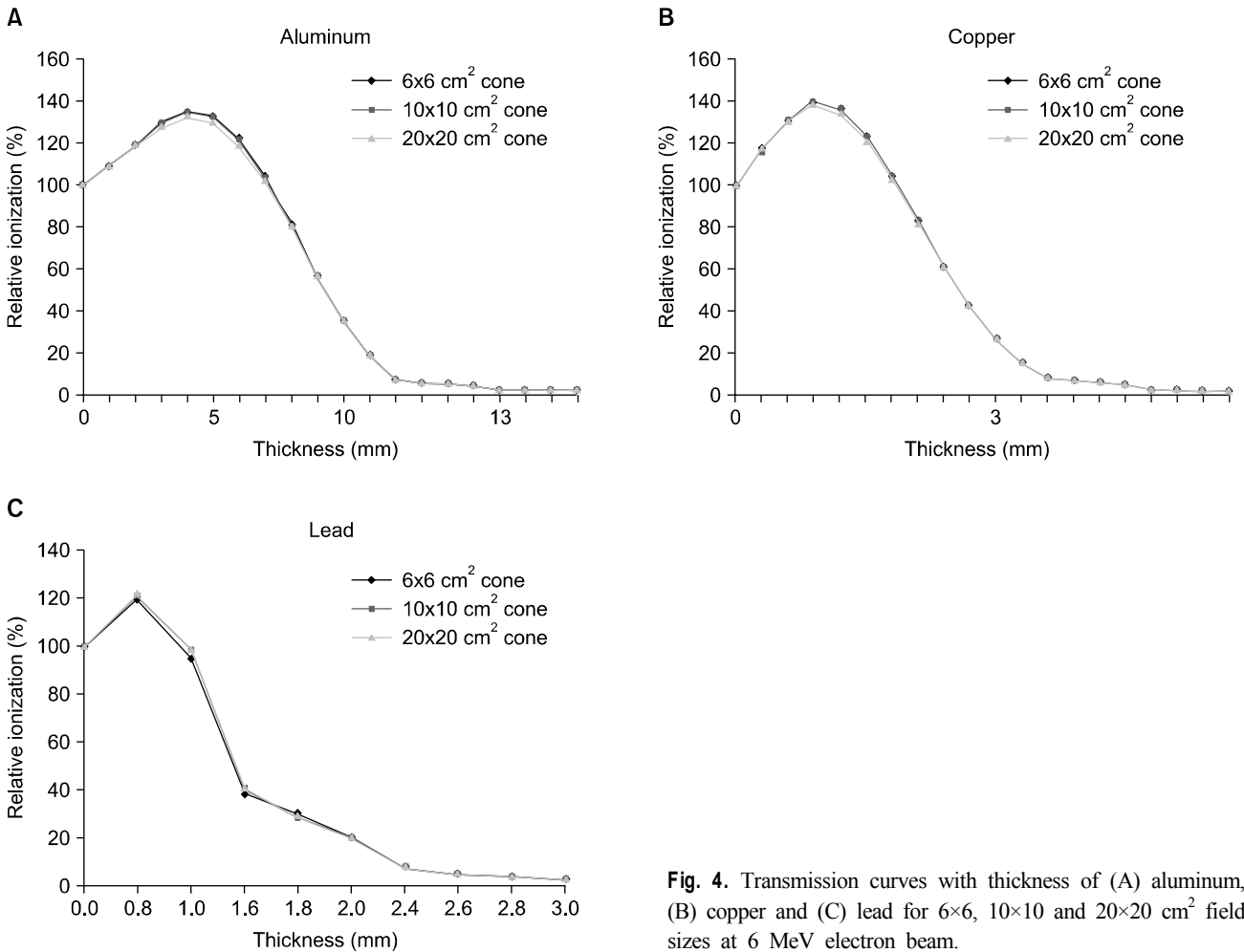


Fig. 4. Transmission curves with thickness of (A) aluminum, (B) copper and (C) lead for 6×6, 10×10 and 20×20 cm² field sizes at 6 MeV electron beam.

한 값으로 폴리스티렌 팬텀 표면에 검출기를 모사한 후 표면 간 거리를 100 cm으로 하였다. 조사야 10×10 cm² 대비 6×6 cm², 20×20 cm²의 축적에너지는 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -4.3%와 +4.85%, 알루미늄 사용 시 각각 -0.87%와 +6.93%, 구리 사용 시 각각 -2.46%와 +4.48%, 납 사용 시 각각 -4.16%와 +5.57%였다. 광자수의 경우 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -8.95%와 +15.92%, 알루미늄 사용 시 각각 -15.56%와 +16.06%, 구리 사용 시 각각 -12.27%와 +15.53%, 납 사용 시 각각 -12.36%와 +19.81%였다. 전자수의 경우 차폐를 하지 않았을 경우 각각 -3.92%와 +4.55%, 알루미늄 사용 시 각각 +0.59%와 +6.87%, 구리 사용 시 각각 -1.59%와 +3.86%, 납사용 시 각각 -5.05%와 +4.00%였다.

고안 및 결론

전자선 조사야 증가에 따른 선량변화가 차폐물질의 종류에 따라 다르게 나타남을 증명하고 영향을 주는 인자를 알아 보았다.

먼저 전리함을 이용한 측정과 몬테칼로를 이용한 계산을 비교한 것으로 깊이 6 mm에서의 단일에너지에 대한 충분한 산란전자가 고려되지 않은 일부구간¹¹⁾을 제외한 대부분의 깊이선량률(Percent depth dose)은 ±2% 이하이며, R₅₀과 R_p은 ±1 mm 이내로 Chow 등¹²⁾과 Karlsson 등¹³⁾이 제시한 값과 일치하여 계산의 신뢰성을 입증하였다.

다음으로 조사야 증가에 따른 차폐물질별 상대이온변화량을 측정과 계산으로 알아보았다. 측정으로 이온증가율은 납 물질에서 Prasad 등²⁾의 결과와 동일하게 조사야 증가에 비례하게 나타났으나 알루미늄과 구리에서 감소현상이 나타났다. 이를 분석하기 위해 MCNP (Monte Carlo N Particle

Table 2. Calculation of photon flux, electron flux and energy deposition for three field size at polystyrene phantom surface (100 cm SSD) under without and with three shielding materials thickness (in mm) which have 5% allowable transmission in 10×10 cm²

Shielding material	Field size (cm ²)	Attenuation 95%		
		Photon flux (particles/cm ²)	Electron flux (particles/cm ²)	Energy deposition (jerks/g)
No block	6×6	1.81096E-04	1.94976E-04	5.01562E-26
	10×10	1.98905E-04	2.02931E-04	5.24123E-26
	20×20	2.30562E-04	2.12607E-04	5.49549E-26
Aluminum (th=12.220000)	6×6	2.6767E-04	7.41403E-06	2.60826E-27
	10×10	3.17005E-04	7.37089E-06	2.63126E-27
	20×20	3.77638E-04	7.87744E-06	2.81370E-27
Copper (th=3.614100)	6×6	3.11321E-04	7.67059E-06	2.57296E-27
	10×10	3.54844E-04	7.79416E-06	2.63808E-27
	20×20	4.09955E-04	8.09476E-06	2.75634E-27
Lead (th=2.360089)	6×6	2.77611E-04	8.03680E-06	2.51998E-27
	10×10	3.16745E-04	8.46431E-06	2.62945E-27
	20×20	3.67514E-04	8.80276E-06	2.77581E-27

Transport Code)로 계산 하였으며, 그 결과 저 원자번호 물질이 고 원자번호 물질보다 산란전자 및 광자의 발생이 다소 높음을 알 수 있었다. 이는 기존 연구들의 산란선발생과 물질원자번호 비례적 관계와 상이한 결과를 보이는 것이지만 다음의 두 가지 원인으로 설명되어 질 수 있다. 첫째로 물질 두께변화에 대한 이차 전자 및 제동복사 발생¹⁴⁾ 및 표면 선량에 영향을 줄 수 있는 후방산란의 연관성으로 설명되어질 수 있다.¹⁵⁾ 즉 본 연구는 물질별 허용투과율을 5%로 조정하려 함에 따라 저 원자번호 물질은 두꺼워지며 고 원자번호 물질은 상대적으로 얇아질 수밖에 없다. 이에 두꺼운 저 원자번호 물질에서 많은 산란전자가 방출 되어 높은 선량증가율을 보이고 있음으로 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 고 원자번호 물질에 비해 저 원자번호 물질에서 표면 선량 증가율이 높아짐을 확인할 수 있었다. 두 번째로 각 조사야별 차폐물질이 없는 경우와 비교하여 차폐물질이 있는 경우 상대 전자에 영향을 주어 그 두께가 감소한 경우로 물질에 따른 측방산란과 후방산란의 영향^{16,17)}이라고 생각된다. 이들을 종합하면 저 원자번호 물질과 상대적으로 두께에 의한 산란전자 및 광자의 발생이 적은 고 원자번호 물질이 조사야 증가에 대한 산란선 영향을 많이 받게 되어 차폐물의 두께가 증가함을 알 수 있었다.

마지막으로 MCNP (Monte Carlo N Particle Transport Code) 코드를 사용하여 물질에 따른 변화요인을 알아보았다. 중심선속 안에 물질이 없는 경우 조사야별 인자를 보면 조사야 6×6 cm², 10×10 cm²와 이차 콜리메이터가 다른 조사야 20×20 cm²에서는 조사야 크기에 비례하여 광자 발생

비율이 높았으나 축적에너지는 증가 비율이 일정하여 조사야 변화만으로 발생하는 광자가 선량증가에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 보여주고 있다. 그러나 중심선속 안에 차폐물질 삽입 시 물질 종류에 따라 각각의 변화가 발생하였으며, 실험에 사용한 물질 중 가장 원자번호가 낮은 알루미늄의 경우 동일한 이차 콜리메이터를 가지는 조사야 6×6 cm², 10×10 cm²에서는 전자 발생이 적은 반면 광자 발생이 증가하여 축적에너지가 증가됨을 볼 수 있었다. 이는 Sathiyam 등¹⁸⁾의 선량증가 원인이 산란 전자에 있다는 것과는 다르게 저지 방사선이 영향을 주는 것으로 보인다. 하지만 원자번호가 약간 높은 구리와 가장 큰 납물질의 발생 입자를 보면 점차적으로 광자 증가 비율보다 전자 증가 비율에 비례하게 축적 에너지가 증가함을 보여주고 있어 Sathiyam 등¹⁸⁾의 이론에 맞게 산란전자가 선량증가에 주요 요인이 될 수 있다는 것을 증명하고 있다.

그러나 MCNPX 계산의 알루미늄과 납 물질의 입자 투과율은 각각 10×10 cm², 20×20 cm², 6×6 cm²와 10×10 cm², 6×6 cm², 20×20 cm²의 순으로 측정에서의 20×20 cm², 10×10 cm², 6×6 cm²과 6×6 cm², 10×10 cm², 20×20 cm²의 증가율과 다소 차이를 보였다. 이는 몬테칼로 계산이 물질과 상호작용으로 산란된 전자선을 표면선량에 많이 기여하여 차이가 발생되었다고 사료된다.¹⁹⁾

본 연구를 통하여 조사야 증가에 따른 차폐물질 두께는 저 원자번호에서는 감소하며, 고 원자번호에서는 증가하지만 산란 변화율이 고 원자번호에서 작으므로 전자선에서의 차폐 물질 선정은 납 물질을 사용하는 것이 적당하다고 사료된다.

참고문헌

1. Prasad SG, Parthasaradhi K, Bloomer WD, et al.: Aluminum, copper, tin and lead as shielding materials in the treatment of cancer with high-energy electrons. *Radi Phy and Chem* 1998;53:361-366
2. Prasad SG, Parthasaradhi K, Arbetter S, et al.: Lead shielding thickness for dose reduction of 6-MeV electrons for different square fields. *Med Phys* 1988;15:263-266
3. Purdy JA, Choi MC, Feldman A: Lipowitz metal shielding thickness for dose reduction of 6-20 MeV electrons. *Med Phys* 1980;7:251-253
4. Tajiri M, Tokiya Y, Uenishi J, et al.: New shielding materials for clinical electron beams. *Radio Oncol* 2006;80:391-393
5. Everhart TE: Simple theory concerning the reflection of electrons from solids. *J Appl Phys* 1960;31:1483-1490
6. Klevenhagen SC, Lamdert GD, Arbabi A: Backscattering in electron beam therapy for energies between 3 and 35MeV. *Phys Med Biol* 1982;27:363-373
7. Prasad SG, Parthasaradhi K, Al-Najjar WH, et al.: Tin shielding thicknesses for electrons. *Med Dosi* 1998;23:21-23
8. Chibani O, Ma CM: Photonuclear dose calculations for high-energy photon beams from Siemens and Varian linac. *Med Phys* 2003;30:1990-2000
9. Pelowitz DB: MCNPXTM user's manual version 2.6.0. LANL 2008
10. Zanini A, Durisi E, Fasolo F, et al.: Monte Carlo Simulation of the Photoneutron field in linac radiotherapy treatments with different collimation systems. *Phys Med Biol* 2004;49:571-582
11. Lee SA, Lee JO, Moon SR, et al.: A study on the simulation and measurement of 6 MeV electron beam. *J Korean Soc Ther Radiol* 1995;13:285-289
12. Chow JCL, Owrangi AM: Depth dependence of electron backscatter: An energy spectral and dosimetry study using monte carlo simulation. *Med Phys* 2009;36:594-601
13. Karlsson MG, Karlsson M, Ma CM: Treatment head design for multileaf collimated high-energy electrons. *Med Phys* 1999;26:2161-2167
14. Tsai YS, Whitis V: thick target bremsstrahlung and target consideration for secondary particle production by electrons. *Phys Rev* 1966;149:1248-1257
15. Hunt MA, Kutcher GJ, Buffa A: Electron backscatter for parallel-plate chamber. *Med Phys* 1988;15:96-103
16. Khan FM: The physics of radiation therapy. 4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2010;241-314
17. 추성실, 서창욱, 김귀연: 산란전자선을 이용한 강내측방조사 기구의 제작과 특성. *대한방사선종양학회지* 2001;19:74-80
18. Sathiyam S, Ravikumar M, Supe SS: Measurement of back-scattered dose at metallic interfaces using high energy electron beams. *Rep Pract Oncol Radiother* 2006;11:117-121
19. Werner BL, Kahn FM, Deibel FC: Model for calculation depth dose distributions for broad electron beam. *Med Phys* 1983;10:582-588

Abstract

The Study of Dose Change by Field Effect on Atomic Number of Shielding Materials in 6 MeV Electron Beam

Seung Hoon Lee, Keun Tak Kwak, Ju Kyeong Park, Yang Soo Gim, Seok Yong Cha

Department of Radiation Oncology, Chonbuk National University Hospital, Jeonju, Korea

Purpose: In this study, we analyzed how the dose change by field size effects on atomic number of shielding materials while using 6 MeV electron beam.

Materials and Methods: The parallel plate chamber is mounted in $25 \times 25 \text{ cm}^2$ the phantom such that the entrance window of the detector is flush with the phantom surface. phantom was covered laterally with aluminum, copper and lead which thickness have 5% of allowable transmission and then the doses were measured in field size 6×6 , 10×10 and $20 \times 20 \text{ cm}^2$ respectively. 100 cGy was irradiated using 6 MeV electron beam and SSD (Source Surface Distance) was 100 cm with $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size. To calculate the photon flux, electron flux and Energy deposition produced after pass materials respectively, MCNPX code was used.

Results: The results according to the various shielding materials which have 5% of allowable transmission are as in the following. Thickness change rate with field size of $6 \times 6 \text{ cm}^2$ and $20 \times 20 \text{ cm}^2$ that compared to the field size of $10 \times 10 \text{ cm}^2$ found to be +0.06% and -0.06% with aluminum, +0.13% and -0.1% with copper, -1.53% and +1.92% with lead respectively. Compare to the field size $10 \times 10 \text{ cm}^2$, energy deposition for $6 \times 6 \text{ cm}^2$ and $20 \times 20 \text{ cm}^2$ had -4.3% and +4.85% respectively without shielding material. With aluminum it had -0.87% and +6.93% respectively and with lead it had -4.16% and +5.57% respectively. When it comes to photon flux with $6 \times 6 \text{ cm}^2$ and $20 \times 20 \text{ cm}^2$ of field sizes the change -8.95% and +15.92% without shielding material respectively, with aluminum the number -15.56% and +16.06% respectively and with copper the change -12.27% and +15.53% respectively, with lead the number +12.36% and -19.81% respectively. In case of electron flux in the same condition, the number -3.92% and +4.55% respectively without shielding material respectively, with aluminum the number +0.59% and +6.87% respectively, with copper the number -1.59% and +3.86% respectively, with lead the change -5.15% and +4.00% respectively.

Conclusion: In this study, we found that the required thickness of the shielding materials got thinner with low atomic number substance as the irradiation field is increasing. On the other hand, with high atomic number substance the required thickness had increased. In addition, bremsstrahlung radiation have an influence on low atomic number materials and high atomic number materials are effected by scattered electrons.

Key words: shielding materials, atomic number, field size, ion chamber, MCNPX